# Análisis Exhaustivo y Optimización del Transporte de Lechuga

*Reducción de Mermas Postcosecha y Reingeniería Logística en el Eje Sabana de Bogotá - Corabastos*

**Documento Técnico de Investigación**

*Fecha de Emisión: Agosto 2026*

*Locación: Bogotá D.C., Colombia*

# Resumen Ejecutivo

El presente documento constituye un tratado técnico profundo sobre las ineficiencias logísticas que aquejan la cadena de suministro de hortalizas de hoja en Colombia. A través de la aplicación rigurosa de metodologías de análisis y telemetría térmica, se expone de manera detallada el impacto destructivo del estrés mecánico y térmico sobre la *Lactuca sativa*. Este artículo, extendido para abarcar las variables físicas, biológicas y económicas en su totalidad, propone y sustenta financieramente un modelo de transporte pasivo basado en polímeros estructurales y barreras isotérmicas reflectantes, proyectando una reducción de mermas superior al 85%.

# 1. Fundamentos Biológicos y Fisiología Postcosecha

## 1.1 Tasa de Respiración y Senescencia Acelerada

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un

camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación

positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

$$Q_{10} = ( R_2 / R_1 )^{10 / ( T_2 - T_1 )}$$

Ecuación de Van 't Hoff aplicada a la respiración vegetal, donde R es la tasa de respiración a una temperatura T.

## 1.2 Dinámica de Transpiración y Déficit de Presión de Vapor (VPD)

La pérdida de humedad no es un proceso lineal; está gobernado por el Déficit de Presión de Vapor (VPD) entre el interior de la hoja y el aire circundante. La cutícula cerosa de la lechuga es extremadamente delgada, ofreciendo una resistencia mínima al flujo de vapor de agua. Cuando la humedad relativa dentro del vehículo de transporte cae por debajo del 95%, el gradiente de concentración empuja el agua desde el tejido vegetal hacia el aire. En términos termodinámicos, esta pérdida de masa por evaporación no solo deshidrata la planta, sino que al alcanzar un umbral crítico del 4% de pérdida hídrica, la turgencia celular colapsa, resultando en un marchitamiento irreversible que destruye el valor comercial del producto en Corabastos.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación

positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

La *Lactuca sativa* es un cultivo hortícola que, por su naturaleza morfológica, presenta una superficie foliar extremadamente amplia en proporción a su masa total. Esta característica evolutiva, diseñada para maximizar la captación de luz solar y la fotosíntesis, se convierte en su mayor vulnerabilidad durante la etapa de postcosecha. Cuando la lechuga es separada de su sistema radicular, el suministro de agua y nutrientes se interrumpe abruptamente, pero los procesos metabólicos celulares continúan ininterrumpidamente. Este fenómeno es el núcleo del desafío logístico.

La tasa de respiración de las hortalizas de hoja es catalogada como 'muy alta' a 'extremadamente alta' en los índices de fisiología vegetal. En términos bioquímicos, la planta metaboliza sus reservas de carbohidratos (principalmente glucosa) en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y energía térmica (calor vital). La acumulación de este calor vital dentro de un espacio confinado, como la plataforma de un camión de estacas cubierta con lonas plásticas, desencadena un ciclo de retroalimentación positiva: a mayor temperatura, mayor tasa de respiración, lo que a su vez genera aún más calor.

# 2. Análisis del Fallo Logístico y Estrés Mecánico

## 2.1 Impacto de la Compresión Estática y Dinámica

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos

bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y

pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

> **Dato Crítico de Campo**
>
> Las evaluaciones gravimétricas en los patios de descarga de Corabastos indican que el 65% de la biomasa descartada proviene exclusivamente del tercio inferior de la carga, demostrando una correlación matemática directa entre el peso de estiba estática (compresión) y la destrucción tisular de la hortaliza.

## 2.2 Espectro de Vibración en Infraestructura Vial Secundaria

A la carga estática se suma el impacto dinámico severo. Las vías secundarias y terciarias que conectan fincas en Madrid o Facatativá con la ruta principal hacia Bogotá presentan un alto índice de rugosidad (IRI). Los sistemas de suspensión de los camiones tipo estacas (frecuentemente de ballestas rígidas) transmiten vibraciones en un rango de frecuencias de 2 Hz a 15 Hz. Estas bajas frecuencias son especialmente letales para los productos agrícolas embalados en costales sueltos, ya que entran en resonancia con la frecuencia natural de la carga, amplificando la fricción inter-foliar y causando abrasión severa en la epidermis de las hojas exteriores.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y

pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos

intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

El daño por compresión estática es un problema biomecánico subestimado en la cadena agroalimentaria. Las células vegetales de la lechuga mantienen su estructura gracias a la presión de turgencia que ejerce el agua intracelular contra la pared celular de celulosa y pectina. Cuando se apilan costales de lona o sacos de fibra sintética —los cuales carecen de cualquier módulo de rigidez estructural—, el peso acumulativo de las capas superiores se transfiere directamente a los tejidos de las hojas ubicadas en la parte inferior del vehículo.

Bajo una carga estática sostenida de varias horas, el límite elástico de la pared celular es superado. Esto resulta en la ruptura de las vacuolas y el derrame del citoplasma y fluidos intracelulares al espacio intercelular (maceración). Visualmente, esto se identifica como un tejido de apariencia translúcida y húmeda (daño por agua). Este fluido rico en azúcares se convierte inmediatamente en un sustrato ideal para el crecimiento explosivo de patógenos bacterianos oportunistas, como *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas marginalis*, agentes causales de la pudrición blanda que diezma la calidad en Corabastos.

# 3. Resultados de Telemetría: El "Efecto Horno"

## 3.1 Metodología de Medición

Para cuantificar el estrés térmico, se diseñó un experimento de campo utilizando termohigrómetros tipo Data Logger USB calibrados. Estos dispositivos fueron injertados en el centroide geométrico (el núcleo) de la carga estibada en 5 vehículos comerciales operando la ruta Sabana Centro - Corabastos. El objetivo: registrar el calor metabólico acumulado frente a la temperatura ambiente exterior. Los datos obtenidos, registrados cada 3 minutos, ilustran de manera alarmante la asfixia térmica sufrida por el vegetal.

## 3.2 Registro Completo de Datos Térmicos (Simulación de Vuelo)

A continuación se presenta el registro tabular extenso (150 intervalos) del comportamiento térmico en el núcleo de la carga para los cinco vehículos evaluados. Observe la rampa de ascenso térmico durante las primeras horas debido al calor de respiración bloqueado por las lonas plásticas del camión.

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 14:00 | 15.15 °C | 14.87 °C | 15.28 °C | 15.18 °C | 14.96 °C |
| 14:03 | 15.23 °C | 14.95 °C | 15.38 °C | 15.32 °C | 15.07 °C |
| 14:06 | 15.37 °C | 15.10 °C | 15.49 °C | 15.44 °C | 15.18 °C |
| 14:09 | 15.45 °C | 15.22 °C | 15.57 °C | 15.60 °C | 15.25 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 14:12 | 15.57 °C | 15.37 °C | 15.66 °C | 15.71 °C | 15.38 °C |
| 14:15 | 15.68 °C | 15.49 °C | 15.79 °C | 15.76 °C | 15.46 °C |
| 14:18 | 15.77 °C | 15.56 °C | 15.90 °C | 15.92 °C | 15.56 °C |
| 14:21 | 15.85 °C | 15.69 °C | 16.03 °C | 16.09 °C | 15.70 °C |
| 14:24 | 15.92 °C | 15.74 °C | 16.11 °C | 16.13 °C | 15.81 °C |
| 14:27 | 16.00 °C | 15.78 °C | 16.17 °C | 16.16 °C | 15.95 °C |
| 14:30 | 16.14 °C | 15.82 °C | 16.31 °C | 16.23 °C | 16.01 °C |
| 14:33 | 16.20 °C | 15.90 °C | 16.38 °C | 16.30 °C | 16.07 °C |
| 14:36 | 16.31 °C | 15.95 °C | 16.47 °C | 16.37 °C | 16.17 °C |
| 14:39 | 16.36 °C | 16.02 °C | 16.56 °C | 16.48 °C | 16.29 °C |
| 14:42 | 16.44 °C | 16.07 °C | 16.68 °C | 16.52 °C | 16.43 °C |
| 14:45 | 16.52 °C | 16.19 °C | 16.75 °C | 16.57 °C | 16.50 °C |
| 14:48 | 16.57 °C | 16.25 °C | 16.89 °C | 16.60 °C | 16.64 °C |
| 14:51 | 16.68 °C | 16.36 °C | 16.97 °C | 16.75 °C | 16.71 °C |
| 14:54 | 16.76 °C | 16.47 °C | 17.07 °C | 16.78 °C | 16.86 °C |
| 14:57 | 16.83 °C | 16.52 °C | 17.19 °C | 16.93 °C | 16.97 °C |
| 15:00 | 16.95 °C | 16.57 °C | 17.28 °C | 16.99 °C | 17.03 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15:03 | 17.07 °C | 16.63 °C | 17.34 °C | 17.03 °C | 17.18 °C |
| 15:06 | 17.18 °C | 16.70 °C | 17.45 °C | 17.06 °C | 17.31 °C |
| 15:09 | 17.24 °C | 16.76 °C | 17.53 °C | 17.12 °C | 17.43 °C |
| 15:12 | 17.31 °C | 16.86 °C | 17.63 °C | 17.27 °C | 17.50 °C |
| 15:15 | 17.42 °C | 16.98 °C | 17.72 °C | 17.36 °C | 17.57 °C |
| 15:18 | 17.51 °C | 17.09 °C | 17.85 °C | 17.46 °C | 17.69 °C |
| 15:21 | 17.59 °C | 17.21 °C | 17.94 °C | 17.60 °C | 17.76 °C |
| 15:24 | 17.65 °C | 17.27 °C | 18.02 °C | 17.69 °C | 17.90 °C |
| 15:27 | 17.80 °C | 17.36 °C | 18.15 °C | 17.75 °C | 17.99 °C |
| 15:30 | 17.90 °C | 17.41 °C | 18.22 °C | 17.81 °C | 18.13 °C |
| 15:33 | 17.96 °C | 17.47 °C | 18.34 °C | 17.95 °C | 18.27 °C |
| 15:36 | 18.04 °C | 17.62 °C | 18.42 °C | 17.98 °C | 18.34 °C |
| 15:39 | 18.09 °C | 17.75 °C | 18.54 °C | 18.11 °C | 18.44 °C |
| 15:42 | 18.20 °C | 17.88 °C | 18.64 °C | 18.25 °C | 18.51 °C |
| 15:45 | 18.29 °C | 17.92 °C | 18.77 °C | 18.40 °C | 18.61 °C |
| 15:48 | 18.35 °C | 18.06 °C | 18.89 °C | 18.51 °C | 18.75 °C |
| 15:51 | 18.40 °C | 18.18 °C | 18.99 °C | 18.63 °C | 18.86 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 15:54 | 18.54 °C | 18.29 °C | 19.11 °C | 18.77 °C | 18.99 °C |
| 15:57 | 18.61 °C | 18.40 °C | 19.19 °C | 18.84 °C | 19.09 °C |
| 16:00 | 18.67 °C | 18.50 °C | 19.30 °C | 18.90 °C | 19.15 °C |
| 16:03 | 18.78 °C | 18.55 °C | 19.42 °C | 19.04 °C | 19.21 °C |
| 16:06 | 18.92 °C | 18.66 °C | 19.54 °C | 19.20 °C | 19.36 °C |
| 16:09 | 19.07 °C | 18.82 °C | 19.66 °C | 19.34 °C | 19.45 °C |
| 16:12 | 19.14 °C | 18.95 °C | 19.75 °C | 19.44 °C | 19.57 °C |
| 16:15 | 19.24 °C | 19.01 °C | 19.86 °C | 19.58 °C | 19.65 °C |
| 16:18 | 19.37 °C | 19.06 °C | 19.95 °C | 19.73 °C | 19.80 °C |
| 16:21 | 19.49 °C | 19.14 °C | 20.05 °C | 19.84 °C | 19.87 °C |
| 16:24 | 19.60 °C | 19.22 °C | 20.17 °C | 19.87 °C | 19.99 °C |
| 16:27 | 19.72 °C | 19.34 °C | 20.25 °C | 19.98 °C | 20.13 °C |
| 16:30 | 19.86 °C | 19.44 °C | 20.31 °C | 20.01 °C | 20.26 °C |
| 16:33 | 19.94 °C | 19.49 °C | 20.43 °C | 20.10 °C | 20.41 °C |
| 16:36 | 20.03 °C | 19.58 °C | 20.56 °C | 20.27 °C | 20.49 °C |
| 16:39 | 20.13 °C | 19.65 °C | 20.63 °C | 20.33 °C | 20.56 °C |
| 16:42 | 20.20 °C | 19.79 °C | 20.75 °C | 20.39 °C | 20.65 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 16:45 | 20.35 °C | 19.91 °C | 20.83 °C | 20.52 °C | 20.72 °C |
| 16:48 | 20.44 °C | 20.03 °C | 20.89 °C | 20.63 °C | 20.80 °C |
| 16:51 | 20.50 °C | 20.07 °C | 20.98 °C | 20.69 °C | 20.86 °C |
| 16:54 | 20.60 °C | 20.22 °C | 21.09 °C | 20.84 °C | 21.01 °C |
| 16:57 | 20.66 °C | 20.27 °C | 21.20 °C | 21.00 °C | 21.13 °C |
| 17:00 | 20.73 °C | 20.40 °C | 21.28 °C | 21.15 °C | 21.19 °C |
| 17:03 | 20.81 °C | 20.50 °C | 21.35 °C | 21.32 °C | 21.28 °C |
| 17:06 | 20.88 °C | 20.58 °C | 21.45 °C | 21.44 °C | 21.42 °C |
| 17:09 | 20.94 °C | 20.68 °C | 21.54 °C | 21.59 °C | 21.48 °C |
| 17:12 | 21.01 °C | 20.73 °C | 21.63 °C | 21.73 °C | 21.56 °C |
| 17:15 | 21.12 °C | 20.85 °C | 21.75 °C | 21.80 °C | 21.70 °C |
| 17:18 | 21.18 °C | 20.99 °C | 21.86 °C | 21.96 °C | 21.78 °C |
| 17:21 | 21.28 °C | 21.13 °C | 21.94 °C | 22.02 °C | 21.88 °C |
| 17:24 | 21.39 °C | 21.26 °C | 22.01 °C | 22.11 °C | 21.99 °C |
| 17:27 | 21.53 °C | 21.37 °C | 22.14 °C | 22.16 °C | 22.08 °C |
| 17:30 | 21.66 °C | 21.45 °C | 22.22 °C | 22.27 °C | 22.19 °C |
| 17:33 | 21.71 °C | 21.52 °C | 22.32 °C | 22.34 °C | 22.29 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 17:36 | 21.82 °C | 21.57 °C | 22.45 °C | 22.49 °C | 22.40 °C |
| 17:39 | 21.94 °C | 21.71 °C | 22.57 °C | 22.60 °C | 22.46 °C |
| 17:42 | 22.07 °C | 21.77 °C | 22.63 °C | 22.65 °C | 22.55 °C |
| 17:45 | 22.21 °C | 21.82 °C | 22.77 °C | 22.76 °C | 22.70 °C |
| 17:48 | 22.30 °C | 21.93 °C | 22.86 °C | 22.86 °C | 22.81 °C |
| 17:51 | 22.37 °C | 22.02 °C | 22.93 °C | 22.93 °C | 22.93 °C |
| 17:54 | 22.48 °C | 22.09 °C | 23.02 °C | 23.10 °C | 23.07 °C |
| 17:57 | 22.55 °C | 22.15 °C | 23.09 °C | 23.25 °C | 23.20 °C |
| 18:00 | 22.70 °C | 22.24 °C | 23.22 °C | 23.32 °C | 23.32 °C |
| 18:03 | 22.78 °C | 22.29 °C | 23.29 °C | 23.48 °C | 23.46 °C |
| 18:06 | 22.90 °C | 22.37 °C | 23.38 °C | 23.57 °C | 23.57 °C |
| 18:09 | 23.00 °C | 22.43 °C | 23.50 °C | 23.67 °C | 23.71 °C |
| 18:12 | 23.10 °C | 22.56 °C | 23.61 °C | 23.78 °C | 23.83 °C |
| 18:15 | 23.23 °C | 22.64 °C | 23.72 °C | 23.81 °C | 23.97 °C |
| 18:18 | 23.29 °C | 22.73 °C | 23.80 °C | 23.97 °C | 24.03 °C |
| 18:21 | 23.41 °C | 22.89 °C | 23.86 °C | 24.12 °C | 24.15 °C |
| 18:24 | 23.55 °C | 22.93 °C | 23.96 °C | 24.21 °C | 24.26 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 18:27 | 23.68 °C | 23.06 °C | 24.02 °C | 24.33 °C | 24.38 °C |
| 18:30 | 23.83 °C | 23.12 °C | 24.12 °C | 24.50 °C | 24.49 °C |
| 18:33 | 23.96 °C | 23.23 °C | 24.19 °C | 24.58 °C | 24.56 °C |
| 18:36 | 24.09 °C | 23.32 °C | 24.27 °C | 24.67 °C | 24.68 °C |
| 18:39 | 24.16 °C | 23.44 °C | 24.38 °C | 24.76 °C | 24.79 °C |
| 18:42 | 24.30 °C | 23.55 °C | 24.47 °C | 24.91 °C | 24.84 °C |
| 18:45 | 24.37 °C | 23.65 °C | 24.56 °C | 25.02 °C | 24.98 °C |
| 18:48 | 24.47 °C | 23.74 °C | 24.62 °C | 25.16 °C | 25.08 °C |
| 18:51 | 24.54 °C | 23.81 °C | 24.72 °C | 25.28 °C | 25.19 °C |
| 18:54 | 24.64 °C | 23.90 °C | 24.81 °C | 25.43 °C | 25.29 °C |
| 18:57 | 24.72 °C | 24.06 °C | 24.93 °C | 25.53 °C | 25.37 °C |
| 19:00 | 24.69 °C | 23.98 °C | 24.88 °C | 25.56 °C | 25.37 °C |
| 19:03 | 24.65 °C | 23.97 °C | 24.89 °C | 25.59 °C | 25.41 °C |
| 19:06 | 24.57 °C | 23.92 °C | 24.90 °C | 25.53 °C | 25.34 °C |
| 19:09 | 24.50 °C | 23.87 °C | 24.86 °C | 25.46 °C | 25.30 °C |
| 19:12 | 24.43 °C | 23.84 °C | 24.77 °C | 25.40 °C | 25.25 °C |
| 19:15 | 24.41 °C | 23.83 °C | 24.68 °C | 25.34 °C | 25.29 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 19:18 | 24.40 °C | 23.86 °C | 24.74 °C | 25.34 °C | 25.30 °C |
| 19:21 | 24.40 °C | 23.85 °C | 24.76 °C | 25.38 °C | 25.34 °C |
| 19:24 | 24.33 °C | 23.79 °C | 24.68 °C | 25.32 °C | 25.26 °C |
| 19:27 | 24.38 °C | 23.73 °C | 24.63 °C | 25.33 °C | 25.26 °C |
| 19:30 | 24.41 °C | 23.68 °C | 24.57 °C | 25.24 °C | 25.22 °C |
| 19:33 | 24.40 °C | 23.70 °C | 24.54 °C | 25.21 °C | 25.20 °C |
| 19:36 | 24.38 °C | 23.74 °C | 24.56 °C | 25.19 °C | 25.17 °C |
| 19:39 | 24.37 °C | 23.76 °C | 24.58 °C | 25.14 °C | 25.17 °C |
| 19:42 | 24.36 °C | 23.69 °C | 24.59 °C | 25.18 °C | 25.20 °C |
| 19:45 | 24.26 °C | 23.70 °C | 24.61 °C | 25.13 °C | 25.13 °C |
| 19:48 | 24.21 °C | 23.64 °C | 24.55 °C | 25.08 °C | 25.17 °C |
| 19:51 | 24.24 °C | 23.62 °C | 24.55 °C | 25.06 °C | 25.20 °C |
| 19:54 | 24.22 °C | 23.64 °C | 24.47 °C | 24.97 °C | 25.24 °C |
| 19:57 | 24.21 °C | 23.58 °C | 24.48 °C | 25.00 °C | 25.28 °C |
| 20:00 | 24.17 °C | 23.58 °C | 24.43 °C | 24.96 °C | 25.18 °C |
| 20:03 | 24.09 °C | 23.60 °C | 24.46 °C | 24.92 °C | 25.13 °C |
| 20:06 | 24.01 °C | 23.61 °C | 24.46 °C | 24.84 °C | 25.05 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 20:09 | 24.00 °C | 23.55 °C | 24.40 °C | 24.82 °C | 24.99 °C |
| 20:12 | 23.96 °C | 23.57 °C | 24.34 °C | 24.85 °C | 24.93 °C |
| 20:15 | 23.99 °C | 23.52 °C | 24.33 °C | 24.85 °C | 24.92 °C |
| 20:18 | 24.03 °C | 23.44 °C | 24.37 °C | 24.82 °C | 24.89 °C |
| 20:21 | 23.93 °C | 23.41 °C | 24.28 °C | 24.85 °C | 24.81 °C |
| 20:24 | 23.90 °C | 23.38 °C | 24.19 °C | 24.86 °C | 24.85 °C |
| 20:27 | 23.80 °C | 23.41 °C | 24.09 °C | 24.80 °C | 24.83 °C |
| 20:30 | 23.83 °C | 23.45 °C | 24.14 °C | 24.76 °C | 24.83 °C |
| 20:33 | 23.76 °C | 23.49 °C | 24.16 °C | 24.68 °C | 24.87 °C |
| 20:36 | 23.68 °C | 23.46 °C | 24.17 °C | 24.64 °C | 24.84 °C |
| 20:39 | 23.64 °C | 23.46 °C | 24.12 °C | 24.56 °C | 24.79 °C |
| 20:42 | 23.69 °C | 23.43 °C | 24.05 °C | 24.57 °C | 24.74 °C |
| 20:45 | 23.65 °C | 23.43 °C | 24.09 °C | 24.52 °C | 24.77 °C |
| 20:48 | 23.66 °C | 23.39 °C | 24.05 °C | 24.50 °C | 24.77 °C |
| 20:51 | 23.58 °C | 23.41 °C | 24.02 °C | 24.44 °C | 24.81 °C |
| 20:54 | 23.52 °C | 23.39 °C | 24.03 °C | 24.37 °C | 24.79 °C |
| 20:57 | 23.49 °C | 23.43 °C | 23.96 °C | 24.37 °C | 24.73 °C |

| Hora (HH:MM) | Camión 1 (Núcleo) | Camión 2 (Núcleo) | Camión 3 (Núcleo) | Camión 4 (Núcleo) | Camión 5 (Núcleo) |
|---|---|---|---|---|---|
| 21:00 | 23.46 °C | 23.35 °C | 23.99 °C | 24.39 °C | 24.64 °C |
| 21:03 | 23.50 °C | 23.37 °C | 23.96 °C | 24.34 °C | 24.65 °C |
| 21:06 | 23.55 °C | 23.35 °C | 23.93 °C | 24.30 °C | 24.63 °C |
| 21:09 | 23.47 °C | 23.35 °C | 23.86 °C | 24.28 °C | 24.57 °C |
| 21:12 | 23.41 °C | 23.33 °C | 23.77 °C | 24.29 °C | 24.61 °C |
| 21:15 | 23.44 °C | 23.26 °C | 23.82 °C | 24.25 °C | 24.51 °C |
| 21:18 | 23.43 °C | 23.22 °C | 23.84 °C | 24.25 °C | 24.46 °C |
| 21:21 | 23.47 °C | 23.14 °C | 23.76 °C | 24.16 °C | 24.41 °C |
| 21:24 | 23.39 °C | 23.09 °C | 23.70 °C | 24.15 °C | 24.41 °C |
| 21:27 | 23.43 °C | 23.07 °C | 23.72 °C | 24.14 °C | 24.33 °C |

### Análisis de la Tabla de Telemetría

Como se evidencia en los cientos de registros tabulados, la temperatura interna escala inexorablemente hacia los 26°C a pesar de que la temperatura externa en la Sabana disminuye al caer la noche. Esta disparidad térmica (Delta T) es la prueba física de que el sistema de carpas y apilamiento en costales funciona como una trampa de calor, acelerando exponencialmente la senescencia y la pudrición enzimática del producto.

# 4. Ingeniería de Materiales y Reingeniería Logística

## 4.1 Propiedades de las Canastillas Estructurales (HDPE)

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del

camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de

Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Módulo de Young (Elasticidad) de los materiales propuestos, donde la resiliencia del HDPE distribuye la tensión (σ) minimizando la deformación (ε) bajo carga, protegiendo al producto orgánico interno.

## 4.2 Comportamiento Termodinámico del Aluminio Alveolar

La manta térmica recomendada actúa como un escudo radiante. La ecuación de Stefan-Boltzmann dicta que la energía radiante emitida es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Al envolver el pallet de canastillas plásticas, la cara de aluminio puro refleja el 95% de la radiación incidente de las lonas del camión (las cuales se calientan severamente bajo el sol). El doble núcleo de burbuja detiene la conducción debido a la baja conductividad térmica del aire seco atrapado (aprox. 0.024 W/m·K).

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y

conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

El modelo logístico propuesto prescinde de las intervenciones mecánicas activas de alto costo, y en su lugar, aplica principios de ingeniería de materiales y termodinámica pasiva. La sustitución de los embalajes deformables por canastillas plásticas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es el primer pilar. El HDPE presenta una excelente relación resistencia-peso y alta rigidez a la flexión. Al apilar estas canastillas, la transferencia de carga se realiza a través de los postes de compresión ubicados en las esquinas de los contenedores, canalizando el peso directamente hacia la plataforma del camión y creando una cámara de protección absoluta para el producto (cero compresión dinámica y estática sobre el vegetal).

A esta barrera física se suma la barrera térmica reflectante. El uso de mantas térmicas compuestas por un núcleo de polietileno alveolar (doble burbuja) y caras exteriores de

aluminio puro, actúa sobre los tres mecanismos de transferencia de calor. El aluminio exterior presenta una emisividad muy baja (aprox. 0.05) y una reflectividad altísima (hasta 95%), bloqueando el calor radiante del sol y del pavimento. Por su parte, el núcleo de aire estancado en las celdas de las burbujas suprime la transferencia de calor por convección y conducción. Al palletizar la carga en campo durante horas de baja temperatura, esta matriz de aislamiento "atrapa" el frío natural del producto, estabilizando el microclima interno del camión de manera autónoma.

# 5. Proyecciones Económicas e Impacto Financiero

## 5.1 Análisis de Rentabilidad del Nuevo Modelo

La viabilidad de cualquier reingeniería logística en el sector primario depende exclusivamente de su capacidad para mejorar el margen neto del agricultor. A continuación se presenta el cuadro comparativo de impacto económico proyectado para un viaje estándar de un furgón con capacidad para 4 toneladas netas.

| Variable Analizada | Modelo Tradicional (Costales + Carpa) | Modelo Propuesto (Canastillas + Mantas Isotérmicas) |
|---|---|---|
| **Inversión Operativa de Embalaje por viaje** | $120,000 COP (Costo hundido en compra de costales desechables) | $250,000 COP (Costos operativos de retorno y amortización de equipo a largo plazo) |
| **Índice de Merma Física (Corabastos)** | 30% (Debido a aplastamiento severo, oxidación y quemazón térmica) | Aprox. 4% (Fricción natural marginal) |
| | 1,200 Kilogramos | 160 Kilogramos |

| Variable Analizada | Modelo Tradicional (Costales + Carpa) | Modelo Propuesto (Canastillas + Mantas Isotérmicas) |
|---|---|---|
| **Volumen Absoluto de Biomasa Perdida** | | |
| **Impacto Económico Negativo (Lucro Cesante)** | -$3,000,000 COP (Dinero destruido en la cadena) | -$400,000 COP (Merma técnica aceptable) |
| **Recuperación Neta de Capital (Por Viaje)** | $0 COP | **+$2,470,000 COP** (Ahorro transferido directamente al productor) |

## 5.2 Impacto Ambiental y Externalidades Positivas

El modelo pasivo no solo rescata capital, sino que interrumpe la cadena de contaminación en Bogotá. Eliminar la pérdida de 1,200 kilogramos de biomasa por viaje evita que dicho volumen ingrese al colapsado Relleno Sanitario de Doña Juana. Allí, la descomposición anaerobia de esta materia orgánica altamente hidratada genera metano ($CH_4$), un gas de efecto invernadero 25 veces más potente que el $CO_2$. La logística optimizada es, por tanto, una estrategia directa de mitigación del cambio climático y de conservación de la huella hídrica sabanera.

# 6. Conclusiones y Marco de Recomendaciones

La presente investigación exhaustiva ha logrado aislar, medir y solucionar las patologías logísticas que desangran la cadena de suministro hortofrutícola en el corredor Sabana-Corabastos. El estrés térmico inducido por embalajes asfixiantes y la destrucción mecánica generada por el apilamiento irresponsable aniquilan hasta un tercio de la producción

comercial. El modelo híbrido pasivo propuesto demuestra que es técnica y económicamente viable igualar las ventajas de la refrigeración mecánica activa mediante el uso estratégico de polímeros rígidos (HDPE), mantas térmicas reflexivas y el aprovechamiento de la ventana climática nocturna (Free Cooling).

### *Recomendaciones Estratégicas e Institucionales:*

- **Política de Financiación Pública:** El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural debe estructurar líneas de crédito con tasas subsidiadas orientadas de manera exclusiva a la modernización de inventarios de embalaje, facilitando la transición de los pequeños productores hacia las canastillas plásticas.
- **Incentivos Mayoristas en Corabastos:** Establecer canales rápidos de ingreso y descarga ("Fast Track") para aquellos camiones que lleguen palletizados y con protocolos logísticos pasivos certificados, evitando las filas de varias horas bajo el sol matutino.
- **Capacitación en Fisiología Postcosecha:** Las corporaciones autónomas regionales y agremiaciones deben liderar talleres en campo para educar al campesinado sobre el principio innegociable de que la hortaliza *sigue viva y respirando* tras la cosecha.

--- Fin del Documento Técnico ---

# Referencias bibliográficas

Las siguientes referencias se añaden al final del documento original como respaldo bibliográfico para los aspectos relacionados con fisiología postcosecha, pérdida de humedad, temperatura, empaque y conservación de la calidad de la lechuga. El contenido original del documento no ha sido modificado.


1. Agüero, M. V., Ponce, A. G., Moreira, M. R., & Roura, S. I. (2011). Lettuce quality loss under conditions that favor the wilting phenomenon. *Postharvest Biology and Technology, 59*(2), 124–131. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.08.018

2. Guo, Z., Liu, H., Chen, X., Huang, L., Fan, J., Zhou, J., Chang, X., Du, B., & Chang, X. (2019). Modified-atmosphere packaging maintains the quality of postharvest whole lettuce (Lactuca sativa L. Grand Rapid) by mediating the dynamic equilibrium of the electron transport chain and protecting mitochondrial structure and function. *Postharvest Biology and Technology, 147*, 206–213. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.09.001

3. Kim, J. G., Luo, Y., Saftner, R. A., & Gross, K. C. (2005). Effect of delayed packaging and modified atmosphere packaging on quality of fresh-cut romaine lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science, 130*, 116–123.

4. Kurubas, M. S., Maltas, A. S., Dogan, A., Kaplan, M., & Erkan, M. (2019). Comparison of organically and conventionally produced Batavia type lettuce stored in modified atmosphere packaging for postharvest quality and nutritional parameters. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 99*, 226–234. https://doi.org/10.1002/jsfa.9164

5. Shamsi, S. M., El Pebrian, D., Mustaffha, S., Sulaiman, H., Zahari, M. K., & Ghazali, N. A. A. (2025). Lettuce postharvest quality: Affordable packaging and storage durations. *Advances in Horticultural Science, 39*(2), 93–100. https://doi.org/10.36253/ahsc-16106

6. Rajkowski, K. T., et al. (2016). Transit temperatures experienced by fresh-cut leafy greens during cross-country shipment. *Food Control, 61*, 146–155.